第 38 卷第 2 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.2
2018 年 1 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Jan.,2018

DOI: 10.5846/stxb201709131643
吕永龙, 王尘辰,曹祥会.城市化的生态风险及其管理.生态学报,2018,38(2):359-370.
Lü Y L, Wang C C, Cao X H.Ecological risk of urbanization and risk management.Acta Ecologica Sinica,2018,38(2):359-370.

城市化的生态风险及其管理

吕永龙[1,2,*], 王尘辰[1,2],曹祥会[1,2]
1 中国科学院生态环境研究中心/城市与区域生态国家重点实验室,北京　100085
2 中国科学院大学,北京　100049

摘要:城市化体现在人口向城市聚集和城市景观扩张的同时,社会结构发生了极大变化,城市生产生活方式向更加广泛的地区扩散。然而,随着人口的过度密集和城市的日益扩张,交通拥堵、空气污染、废物堆积、流行病肆虐等"城市病"频发。城市通过大量汲取和消耗自然资源,向周围环境排放大量污染物,改变了区域生态系统的原有结构和功能,产生了严峻的生态风险,进而制约着城市生态系统的可持续发展。城市化的生态风险正逐步得到广泛关注,但对其具体的内涵和影响尚不明晰。归类描述了城市化过程中面临的各种生态风险,分析了导致生态风险的主要因素,阐述了辨识与评价生态风险的基本方法,提出了城市化生态风险的调控管理对策。

关键词:城市化;生态风险;风险评价;风险管控

Ecological risk of urbanization and risk management

LÜ Yonglong[1,2,*], WANG Chenchen[1,2], CAO Xianghui[1,2]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: With urbanization, not only population is gathering to the city and urban landscape is expanding, but also social structure is changing greatly. At the same time, urban modes of production and consumption are spreading to a wider area. However, with over-concentrated population and extensive expansion of cities, "urban diseases" such as traffic congestion, air pollution, waste accumulation and epidemics occur frequently. City consumes natural resources excessively and discharges a large amount of pollutants to the surrounding environment, which will change the original structure and function of regional ecosystem, and then severe ecological risks emerge and the sustainable development of urban ecosystem is constrained. The ecological risks of urbanization have been gradually getting more attention, but the concrete definition and impacts of urban ecological risks are still unclear. Therefore, this paper defines all kinds of ecological risks and analyses their main influencing factors in the process of urbanization. The major methods for ecological risk identification and assessment are also expounded, and some suggestions for ecological risk management of urbanization are presented.

Key Words: urbanization; ecological risk; risk assessment; risk management

城市化不仅表现为人口向城市的集中和城市面积的扩张,还表现为农业活动向非农业活动转换和城市生产生活方式的扩散,它是一个经济、社会、文化等多种因素综合发展的过程[1-2]。改革开放以来,中国城市化

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505704);国家自然科学基金重点项目(41420104004)
收稿日期:2017-09-13;　**修订日期**:2017-10-23

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: yllu@ rcees.ac.cn

水平由 1978 年的 17.92%上升到 2016 年的 57.35%,预计 2030 年中国城市人口将达 68.7%[3-5]。城市为人类提供了便利的基础设施和舒适的生存环境,促进了社会经济更加高效的发展,然而,人口的过度密集、空间过度扩张、城市发展规划的不合理、产业结构的失调和以人类为中心的发展策略等问题导致城市生态格局、生态过程与服务功能发生恶化,影响着城市生态系统的健康与可持续发展。

随着对生态环境问题认识的进一步加深,环境保护观念和环境管理目标已发生了深刻变化。在考虑成本控制和社会经济整体可持续发展的前提下,环境管理不再单纯强调污染物的零排放和生产消费过程的"零风险",进而转为对风险源辨识、风险级别和后果的权衡与应对。近年来,生态风险评价方法得到了迅速的发展,成为生态环境管理不可或缺的重要手段。环境风险、生态风险和健康风险等名词不断出现在各类研究中,但对各自的内涵及相互间的区别并没有统一的认识。美国环保局发布的生态风险评价框架中对生态风险的定义是不良生态效应发生的可能性,其主要内容包括受体暴露于单个或多个胁迫因子的概率和暴露后所产生的胁迫效应的程度[6]。部分国内学者认为生态风险是指生态系统中由自然变化或人类活动引起的非期望事故或灾害等造成生态系统结构和生态过程改变,进而损害生态系统功能的概率[7-9]。而在进行生态风险分析时,其内涵与生态效应密切相关,反映了生态系统受到自然和人类活动胁迫的概率和规模[10]。本文基于生态风险的基本内涵,将城市化的生态风险概括为城市发展建设和城市人类活动所导致的生态要素、生态过程和生态系统服务等发生不良变化或人类健康受到威胁的程度和可能性。

城市化的生态风险按照其风险源的不同可分为人为风险和自然风险两大类。城市化过程包含了城市建设、城市维护以及支撑城市发展的生产生活过程等,其产生的风险主要包括:环境污染直接导致的生物体的健康风险;环境质量恶化间接引起的系统结构损害和功能退化的风险;城市建设过程和生产生活过程导致的资源紧缺的风险;生态系统破碎化、脆弱化,生态结构损害和功能退化的风险[8](表 1)。同时,随着人类活动对全球和区域过程的影响的加深,城市化改变了原有的生态系统过程,激化了部分自然灾害的发生频率和程度,增加了损害人类生命安全和脆弱生态系统的风险。

表 1 城市化的生态风险[8-9]

Table 1 Ecological risk of Urbanization

风险源 Risk source	风险类型 Risk Category	主要风险 Main Risks	影响因素 Factors
人为-自然 Anthropogenic &Natural	突发灾害	城市热岛效应、极端降雨事件,洪涝灾害,地面沉降	不透水面积,温室气体浓度,植被覆盖率,地下水开采等
人为 Anthropogenic	污染(化学过程)	水体、大气和固体废弃物中污染物的毒性效应,生物地球化学循环的改变	重金属、持久性有机污染物、药品和个人护理用品的排放,氮、磷等营养元素的过度使用等
	生物	物种灭绝、植物生态系统的单一化、外来物种入侵、生物多样性锐减、病原菌和有害生物	生境减少,景观破碎化,连通性降低,外来物种的引进等
	资源(物理过程)	水资源、土地资源紧缺及城市植被覆盖率和耕地面积降低	生境流失,人口增长,城市扩张,耕地减少,资源过度开采等

1 城市建设导致环境变化的生态风险

城市化一方面增加了对土地资源、水资源、能源和生物资源的需求,通过土地利用方式的变化改变了原有的生态环境结构和过程;另一方面引起了区域景观的破碎化和环境质量的下降,削弱了区域生态系统的支撑功能,进一步加剧了区域自然-社会-经济复合生态系统可持续发展面临的风险。

1.1 城市土地扩张造成的风险

城市土地扩张造成的生态风险主要表现为两方面:首先在于城市面积的无节制扩张导致的可耕地资源的紧缺;其次是土地利用变化后,对原有生态过程、结构和功能的改变所引发的生物多样性减少等风险。

城市化过程激化了城市土地需求、农田土地需求和生态土地需求之间的矛盾。2000 年至 2016 年中国耕地由 1.85 亿 hm^2减少到了 1.28 亿 hm^2,主要原因是城镇建设用地的侵占,其中大部分省市并未实现耕地占补平衡,这使得全国耕地占补平衡存在着巨大的生态风险,极大地影响着粮食安全[11-12]。以陕北地区为例,1990 年至 2010 年间,由于城市建设所致的耕地侵占使该地区农田初级生产力总体下降了 41.90%[13]。不仅如此,被转为城镇建设用地的农田大部分为良田,而增补的耕地绝大多数不适宜耕作,致使农田生态系统的整体质量下降[14]。由建设用地转为耕地和绿地的土壤中通常积累了大量建筑垃圾和污染物,包括重金属和有机污染物等,能通过不同暴露途径对生物体和人类健康造成风险[15]。同时由于土地表面长期硬化,其土壤有机质和水分含量低,不适宜植物和作物生长。城市建设用地的无节制扩张还可能为区域环境增加了额外的污染物输入,影响了其原有的环境过程,进而造成生态服务功能的退化。为了提高单位面积耕地的粮食产量,通过施肥向环境中输入的硝酸盐量已是自然过程的两倍以上[16]。在耕地平均质量退化和粮食需求日益增长的双重压力下,耕地逐步向边缘和破碎化地区以及其他自然生态系统蔓延[17]。在热带地区,每年有近 1200 万 hm^2的森林由于耕地扩张而遭到砍伐[18]。经粗略估计,人类活动改变了全世界近 50%的土地覆盖,生物多样性从 1500 年至 2005 年平均降低了 8.1%,物种灭绝的风险急剧增高[19-20]。从景观格局而言,城市土地的扩张和农田的增减造成了生境的破碎化,增加了区域景观的脆弱性和敏感性,使得区域景观生态风险显著升高[21-23]。

1.2　水文变化与水资源短缺的风险

城市建设通过对水文结构和功能的改变引发了生态风险。河网水系不仅是自然界最重要的生态系统之一,而且是水资源形成与演化的主要载体[24-25]。随着城市化和工业化的快速推进,流域土地利用的类型发生了剧烈的变化。快速城市化地区许多河道被淤积和填埋,河流水系数量明显减少,导致全球范围 60%的河流水系的形态参数发生不良变化[26-28]。我国东部河网水系演化受自然因素与人类活动共同影响,但近 30 年来该地区河网水系受人类活动干扰强烈,长三角、珠三角、海河流域及太湖等地区的河流水系的数量锐减、结构简化和功能下降,永定河京津段河道长度减少 20.5%,河道数量减少 36.4%,水系结构简单化以及河网连通性较差[29-31]。这些变化使得河流水系的生态完整性遭到严重破坏,导致其生态系统服务功能急剧退化甚至丧失[32],并引发了水环境恶化和生物多样性降低等众多生态环境问题,从一定程度上制约了区域的可持续发展。此外,河道周边城市建筑物增多、道路铺装、排水管网建设,以及河道硬化等,直接改变了地面径流的形成条件。城市水文现象受到人类活动的强烈影响,主要表现为:地表径流量增加,流速加大;径流系数加大;洪峰增高,峰现时间提前,历时缩短;径流污染负荷增加;河流的自然排水功能下降等[33-35]。水文性质的变化使雨水的汇流过程发生变化,从而改变了城市区域洪水的发生机制,并导致洪涝灾害的风险增加。

在水系结构变化、城市用水量剧增以及水体污染的多重压力下,城市水资源紧缺的风险越发严重。据世界卫生组织(WHO)统计,全球约有 12 亿人口缺乏安全饮用水,1/3 的人口面临水资源短缺问题[36]。预计到2050 年,全球对水资源的需求将升高 40%;到 2025 年,约 18 亿人将居住在水资源缺乏的城市和地区,全世界 2/3 的人口的用水需求将得不到满足。生产生活用水与区域水资源的不协调,造成了生产用水、生活用水和生态需水的供需均面临着巨大的风险[37-38]。其中不合理的城市绿化造成了水资源的极大浪费,特别是对于干旱和半干旱地区。大多数的绿地植被为外来引进物种,不一定适合城市当地气候条件,每年需要大量的水进行浇灌,而一旦停止浇灌和维护后多数植被将难以存活,这给本就紧张的城市用水带来了巨大压力[39]。为了应对区域水资源的短缺,虽然利用再生水进行农业生产和城市绿地的灌溉缓解了用水压力,但同时有可能造成新的潜在风险。经过简单处理的再生水仍含有一定量的重金属和痕量污染物,包括多环芳烃、激素类物质、抗生素、全氟化合物和其他有机污染物等[40-41]。长期使用再生水不仅会增加土壤盐渍化的风险,还会导致污染物在环境中和食物链中的大量积累,从而影响到人类和生态系统健康[42-44]。

1.3　城市植被与生物多样性变化的风险

快速的城市化过程加剧了城市植被和生态系统发生系统性变化的风险。受城市化影响,城市植被的特征

通常表现为覆盖率下降,景观结构破碎化程度增加、连通性降低,物种多样性减少等[45-46]。城市植被不仅面临着面积减少和破碎化的直接影响,城市发展还通过改变环境要素质量的方式间接影响着城市植被。从个体而言,城市热岛、大气污染、水环境的改变等都不同程度地影响着城市植被的生长发育状况,造成其物候、叶面积、结籽率、蒸腾作用等生理特征发生变化[47-49]。从整体而言,土地覆盖的变化不仅导致植被数量的减少,还致使其所支撑的其他物种(包括昆虫、鸟类等)消失或迁徙,生态系统的组成结构和功能均发生改变[50-51]。在2000年前后,世界生物多样性较高的地区被城市所取代的面积不到1%;而近年来的城市化进程正加速地侵占或破坏着生物多样性较高的区域,其中包括“世界自然保护联盟”濒危物种名录中近200个物种的栖息地将直接受到影响[52-54]。在本地物种多样性急剧减少的同时,外来物种和部分对城市环境适应性较强的物种的数量呈上升趋势,这促使了城市生态系统的物种组成趋于同质性,而整体的生物多样性降低[55]。虽然有部分研究表明,从世界范围来看,局部地区的生物多样性变化并没有导致全球的物种多样性出现系统性减少,但是城市化进程引起了城市化地区或更大范围内的生物群落的组成结构和多样性的改变,而这将影响到区域生态系统的整体功能和适应性[56-57]。

2 城市环境污染造成的生态风险

城市化进程中向环境介质排放了大量的污染物,在没有得到妥善处置的情况下,它们可能对生物个体和生态系统产生负面影响,进而对城市生态格局、生态系统服务以及人类居住环境造成风险[58-59]。城市活动排放的污染物主要通过废水、废气和固体废弃物三种形式进入环境中,直接导致了水、土、气等环境介质质量的恶化。

2.1 大气污染的生态风险

近年来,由于快速的城市化和气候变化,我国经历了持续的严重空气污染。从2014年到2016年,$PM_{2.5}$的年人口加权均值分别为65.8、55.0μg/m^{3}和50.7μg/m^3,PM_{10}分别为107.8、91.1μg/m^{3}和85.7μg/m^3,NO_2分别为39.6、33.3μg/m^{3}和33.4μg/m^3,SO_2分别为34.1、26μg/m^{3}和21.9μg/m^3,O_3(8h浓度)分别为54.8、56.2μg/m^{3}和57.2μg/m^3,其中北部地区较南部地区污染严重[60]。城市大气污染的来源主要以煤炭、石油等化石燃料、垃圾焚烧以及工业生产过程中的废气为主[61-62]。城市化诱发的大气污染对生态系统影响极大,主要表现为氮沉降、臭氧、温室效应、酸雨和空气颗粒物浓度增加等。氮沉降改变了生态系统碳氮循环的耦合关系以及增加了温室气体(CH_4、CO_2和N_2O)的生物排放[63];臭氧(O_3)能对植物从生化、微观结构到生理功能、生长发育以及生态系统的层次上产生不同的影响,臭氧浓度的增加改变了凋落物的产量从而显著影响了生态系统的磷及营养盐循环的过程,臭氧具有较强的氧化能力,氧化产物OH, O_2^-和H_2O_2会使叶绿素含量降低、叶片黄化、叶面积下降、叶片膜系统受到伤害、叶片净光合速率下降[64-65];另一个重要的风险来源于酸雨的形成,酸雨具有很强的腐蚀性,因此会严重危害森林、植被、农作物以及水生和陆生环境,从而导致农作物大量减产,酸雨还会改变土壤的酸碱度,降低土壤土质,严重侵蚀土壤,使得土壤的生产能力受到极大的破坏。除此之外,酸雨还会造成地表水系环境的污染,影响河流湖泊的水质,从而引发水生生物的死亡[66]。随着对空气污染的管控和治理,以及城市能源结构的改变,大气颗粒带来的风险逐步得到了关注。大气中颗粒物浓度的增加不仅直接危害人类和生物体的健康,还影响地球辐射平衡,增强大气温室效应,并能通过同云层的反应,抑制降水进而扰乱水文状态[67]。

2.2 水体污染的生态风险

城市的生产生活过程等产生的营养元素、金属盐、抗生素药物和持久性有机污染物等进入水体,造成了严重的水体污染[68-69]。水体污染导致的富营养化破坏了水生生物的生存环境,打破了生物链的生态平衡,造成了水生生物数量、种类的减少和系统形态的变异[70]。同时,异常增殖的藻类分泌大量生物毒素,不仅威胁水生生物的生存,而且对人体健康构成威胁,如一些赤潮生物(微原甲藻、裸甲藻等)能产生对人体毒性很大的麻痹性贝毒(PSP),当人误饮误食后,会引起病变甚至死亡。此外,使用污水灌溉,降低了土壤质量,使作物减

产、品质降低,对农田生态系统产生风险,甚至危害到人畜健康[71-72]。

2.3　固体废弃物的生态风险

城市固体废弃物是城市化生态风险的重要风险源之一,全球城市每年产生 13 亿 t 固体废弃物,预计到 2025 年将达到 22 亿 t,增加部分主要来自发展中国家快速成长的城市[73]。目前,我国城市垃圾年产量已达 1.5×10^8左右,同时以每年约 8%的速率增长,预计到 2030 年可达到 3.29 亿 t[74]。固体废弃物的处理方式一般包括填埋、堆放和焚烧等,其中填埋和堆放的方式最为普遍。土地是宝贵的自然资源,我国虽然幅员辽阔,但耕地面积却十分紧缺,人均耕地面积只占世界人均耕地的三分之一。城市固体废弃物的堆积不仅侵占了大量土地,造成了极大的经济损失,并且严重地破坏了生态环境。

在固体废弃物的填埋与堆放的过程中,产生大量渗滤液和恶臭气味。渗滤液中通常含有大量有机废水、无机污染物、重金属、细菌等有毒有害物质,且 COD、BOD_5、NH_3-N 浓度较高[75-76]。这些有害物质会改变土壤的性质和土壤结构,并将对土壤中微生物的活动产生影响。土壤是许多细菌、真菌等微生物聚居的场所。这些微生物形成了一个生态系统,在大自然的物质循环中,担负着碳循环和氮循环的一部分重要任务。城市固体废弃物、工业固体废弃物、特别是有害固体废弃物,经过风化、雨雪淋溶、地表径流的侵蚀,产生高温和毒水或其他反应,能杀灭土壤中的微生物,导致土壤丧失腐解能力,致使土壤肥力和土质的改变,植物又是生长在土壤中,间接又对植物产生了污染,导致草木不生,有些土地甚至无法耕种。此外,固体废弃物释放的有害物质阻碍植物根系的发育和生长,同时还会在植物有机体内积蓄,通过食物链危及人体健康。

固体废弃物随天然降水或地表径流进入河流、湖泊,或随风飞扬落入河流、湖泊,污染地面水,并随渗滤液渗透到地下层,污染地下水体[76]。即使无害的固体废弃物排入河流、湖泊,也会造成河床淤塞、水面减小以及水体污染,甚至导致水利工程设施的效益减小或废弃。我国沿河流、湖泊、海岸建立的许多企业,每年向附近水域排放大量灰渣。仅燃煤电厂每年向长江、黄河等水系排放灰渣万吨以上。据统计,垃圾填埋场污染物渗透已经造成了中国 64%的城市土壤及周围水体和生态环境受到较重污染,33%受到轻度污染[77]。

此外,堆放的固体废弃物中所含的粉尘及其他细微颗粒等可随风飞扬,从而对大气环境造成污染。而且堆积的固体废弃物中某些物质的分解和化学反应,产生大量的氨和其他的有机挥发气体(如含氯氟烃,CFCs)[77],造成地区性空气污染。在城市固体废弃物运输及处理过程中缺少相应的防护和净化设施,释放有害气体和粉尘,堆放和填埋的城市固体废弃物以及渗入土壤的废弃物,经挥发和反应放出有害气体,都会污染大气并使大气质量下降。

3　城市突发事件与灾害的生态风险

城市化对生态环境产生的各种效应通过连锁反应产生了正反馈放大作用,从而使城市中的某种要素水平超过了其临界阈值后就会产生灾变性事件,主要体现在地质灾变、环境灾变和生态灾变等方面[78]。

3.1　城市热循环变化的风险

气候变化导致了极端高温事件的发生频次增加和影响范围的扩大[79]。城市作为人类活动的主要场所,是温室气体排放最为集中的区域,全球气候变化与城市化被认为具有不可分割的联系。除却温室气体排放的影响外,城市化所导致的土地利用\覆盖类型的变化,极大地改变了区域的地表水热交换过程,再加上城市人口的急剧增加,人为热源释放了大量的热量,从而使得城市地区的平均气温明显高于周边非城市区域,即"城市热岛效应"[80-81]。据估计,城市化引起的土地利用类型的转变所导致的全球地表温度上升的速度达到了每世纪 0.27℃;从 1961 年至 2013 年,我国地表平均温度受城市化影响增高了约 0.49℃[82-83]。城市热导效应的生态风险主要包括高温直接造成的人群和生物体的健康风险,以及由高温间接引起的热循环变化和生态环境效应所产生的风险。极端高温会引起城市居民心脑血管和呼吸道等疾病发病率和死亡率的增加[84]。据估算,2012 年至 2013 年间我国济南由城市热浪导致的非正常死亡人数的增加占到了总体水平的 24.88%,同时其诱发的心血管疾病的死亡率增加了 31.33%[85]。老年人和幼儿等人群对高温影响更加敏感,伴随城市化水

平的增加和城市人口的老龄化,全球气候变化将增加全球许多城市未来的高温健康风险[86-87]。

除却极端高温的健康风险外,区域热环境的改变还会影响区域气候、城市水文、空气质量、城市土壤理化性质、城市生物分布与行为,进而改变物质代谢和能量循环过程,引发一系列的生态环境问题[88]。由于城市热岛效应,在雨季城区降雨量和地表径流量明显大于周围农村地区;此外,高温增加了可挥发性有机物(VOCs)的挥发,促进了近地面臭氧等二次污染物的形成,同时,城市产生的污染物还会随大气流动输送到郊区,使郊区臭氧浓度上升,进而造成粮食的减产。在城市热岛的影响下,城区土壤温度明显高于周围自然土壤,土壤温度的升高又改变了土壤微生物的活性和多样性[89]。在水文、土壤和温度的综合作用下,城市地区的生物物候、生理活动、繁殖行为和种群结构发生了改变。温度升高不仅使城市区域植被的蒸发蒸腾量提高了10%[90],还使部分树种在高温下的繁殖率下降和死亡率上升[91],导致敏感树种在未来气候变化的影响下存在极大的生存风险,进而损害其生态服务功能[92]。城市温度的升高还促进了微生物、苍蝇、蚊虫等的大量繁殖,增加了流行性疾病的传播风险。

3.2 城市内涝风险

全球平均气温的升高不仅加剧了局部地区的城市热岛效应,还增加了部分地区特别是沿海城市洪涝灾害的风险。据估计,截止到2050年全球由于洪涝灾害造成的沿海城市的经济损失可能达到平均520亿美元[93]。城市化导致的不透水面的增加,加上气候变化的影响,使得内涝灾害发生的频率和强度增加。当不透水地面占20%,平均洪水流量为17.8 m^3/s,洪水汇流时间为3.5 h;而当不透水地面增加至40%,平均洪水流量可达57.8 m^3/s时,洪水汇流时间减少为0.4 h[94]。随着城市面积的进一步扩张,大型城市的地面不透水层往往可达70%—90%,这严重影响着洪灾的发生频次和强度,在短时间内给城市带来较大的排水压力。当大量径流沿河道输送至下游时,会严重影响下游城市的泄洪,给下游城市带来严重的排水压力,同时对河网水系结构也会产生一定的冲击。城市内涝对周边生态系统的破坏也是极其严重的,城市本身处在一个生态环境极为脆弱的体系之中,长期的淹水条件会对动植物生长造成严重的影响。洪涝灾害在造成重大经济损失的同时,严重威胁着人类生命安全和区域生态系统的健康[95]。在2008年至2010年间,中国近62%的城市遭受了洪涝灾害;而2012年北京的特大暴雨直接导致了79人的丧生[96]。

3.3 城市地面沉降的风险

城市建设过程中的不合理开采地下水、岩土体开挖及削坡等增加了地面沉降的风险。从1921年上海市区最早发现地面沉降现象至今,我国已有近96座城市出现了不同程度的地面沉降问题,重灾区主要是长江三角洲地区、华北平原和汾渭盆地,其中上海的沉降累计达2.63 m,天津达2.6 m,苏锡常三市沉降中心沉降量都超过了1.0 m等,沉降面积达到了93885 km^2[97-98]。地面沉降降低了沉降区抵御洪涝灾害的能力,大幅度增加了低洼湿地面积,使耕地沼泽化,加重渍害,恶化了生态环境和农业生产条件[99]。一些地区地面沉降甚至导致海水倒灌,如大连、秦皇岛、烟台、青岛等沿海地区都不同程度地存在海水入侵现象,由此加剧了水资源的紧缺状况。此外,由于地下施工如地铁施工以及铺设排水管道等,产生了城市地面塌陷的风险,这会对城市建筑、植被等造成破坏,进而会对土地利用格局产生一定的影响,因此,在土地规划时必须采取合理地手段以规避地面沉降所导致的塌陷风险。

4 城市生态风险评价与管理

4.1 城市生态风险评价

作为评定生态效应和有效管理风险的重要工具,生态风险评价(Ecological risk assessment, ERA)是指定量地确定社会经济发展中产生的一个或多个风险源可能或已经带来的生态负效应的概率及强度的过程[100]。根据生态风险评价的内容、范围和尺度的不同,其评价过程有所区别,但一般包括5个基本部分:源分析、受体评价、暴露评价、危害评价和风险表征。如今,生态风险评价的内涵覆盖了从生物个体水平、种群水平、群落水平到生态系统水平、区域生态水平以及城市自然整体水平等多个层次的内容(图1)。评价过程注重对复杂生

态系统特征的解析,深入分析多风险因子、多风险受体、多评价终点、不确定性因素以及空间异质性等 5 个主要特点[101]。同时,关键物种、种群、群落、生态系统或重要生态过程和生命阶段均可作为化学污染、气候事件以及人类活动等风险因子的评价受体,而不同水平上的特征指标均可以作为生态风险评价的终点[8,101]。

图 1 城市生态风险评价指标和方法[7-9, 22, 101]

Fig.1 Assessment index and methods in urban ecological risk assessment[7-9, 22, 101]

城市化的生态风险评价的特点在于将城市社会和自然作为一个系统整体。传统的生态风险评价主要关注人类活动在不同尺度上产生的一系列生态环境效应,通常将生态系统中的某一生态指标作为评价终点。而城市化的生态风险评价着重考察城市化过程与生态系统健康之间的关系,将提升城市发展和生态环境的耦合度,实现城市自然-社会-经济复合生态系统的可持续发展作为最终的评价目标[102]。目前生态风险评价主要针对单一或者多种化学污染物造成的风险,如重金属、农药以及持久性污染物(POPs)等;单一受体的风险,如个体、种群和群落;单一生境的风险,如土壤、水和介质等;小尺度的风险,如流域等;系统水平的风险,如综合风险、景观风险等。针对单一受体的评价方法主要基于美国生态风险评价准则的基本框架。而针对多因素和多受体以及系统水平上的风险的评价手段则主要有综合指数法和模型模拟法,其共同优点是包含了风险源强度、风险受体与评价终点特征等信息,能够对风险产生的概率、强度及时空特征进行系统全面的估计和预测[8]。综合指数法综合了多个因素指标进行评价并定量化,而对于非定量化因子,通过采用质量等级评分和专家意见等方式进行定量化。针对景观格局和整个生态系统,常用的综合指数法主要包括:生物效应评价指数法、权重法以及相对风险法[103-104]。近年来,综合指数法中基于多介质和多污染物的生态风险评价方法得到了极大的发展。通过综合比较不同污染物在不同介质中的暴露水平和暴露概率并结合其毒性效应水平,进行风险的综合定量的方式,较为准确地衡量了污染物在真实环境中的生态风险水平[105]。而面对系统的复杂性,模型模拟已成为最重要的生态风险分析手段之一,主要包括问题分析模型(problem decomposition model, PDM)、情景组合模型(scenario composition model, SCM)、基准模型(criteria model, CM)、风险定量模型(risk quantification model, RQM)等(图 1)。而综合应用多种模型组合,即系统模型(system model)法将是今后城市

生态风险评价方法的发展方向之一。

城市化的生态风险主要发生在区域尺度上，其特点包括多介质、多受体和多风险源等，这在一定程度上加大了对其评价的难度。基于资料、技术和工具局限，目前的一些生态风险评价没有脱离传统生态风险评价的模式和框架，也没有突破传统毒理方向上的毒性效应风险评价方式，在不确定性、尺度外推、指标体系不统一、评价标准不统一、区域内污染物的整合、风险因子筛选及优先排序、特殊的人为因素、水生到陆生生态系统的过渡等方面均存在着不足[101]，而这些方面也是未来生态风险评价的关键问题及研究难点所在。

4.2 城市生态风险管理

生态风险管理(ecological risk management，简称 ERM)主要包括三个方面的内容：确定风险容忍度、风险决策和实施降低风险措施[106]。城市化的生态风险管理是个复杂的、动态的、综合的过程，其完整风险管理体系的构建，应从城市化地区和自然生态系统整体水平上考虑风险的缘由、影响范围、损失大小和预防与控制过程。由于城市化生态风险的内容涉及多个风险源、多个受体、多个尺度和多个系统，因此，相应的风险管理框架应涵盖多个水平上的风险，并在区域范围上对其进行整合。在整体水平上，应该要特别重视城市化的生态规划和生态建设，合理地进行土地利用规划，合理布局工业区、交通干线、生活居住区和植被覆盖等。应根据生态风险评价的结果和社会经济发展的实际情况，优先考虑重要的生态风险进行优先管控。在整体规划框架下，涉及不同子区域和单个水平上的风险，应采取针对性的管控措施。

对于污染物的生态风险，应首先做到清洁排放，资源的循环利用；其次，通过分析不同污染物的危害程度，采用不同模型和方法对其生态风险进行评估，并结合模型给出其在区域空间上不同介质和暴露途径的风险等级预报；最终，根据风险等级进行不同程度的防范。对于城市热循环变化，减少下垫面的硬化面积，提高城市植被覆盖率；同时减少人为活动产生的废热及温室气体，主要来自工厂车间机械生产、交通运输中机动车排放、空调运转和人们日常生活及建筑物等[107]。对于城市土地扩张的生态风险，调整优化土地利用结构，适度控制城市建设用地的规模和速度，合理布局工业区、交通干线、生活居住区和绿色基础设施用地，构建生态城市。对于水资源短缺风险，禁止工业、农业及生活污水未经处理向河道的排放，节约用水，提高水的利用效率，重点加强对水源地的保护。对于城市植被和生物多样性锐减的风险，做好景观生态保护规划，传统保护途径是以物种为中心，这种做法虽然暂时缓解濒危物种灭绝的严重局面，但是不能从根本上解决问题；而以景观生态学的原理和方法，不仅要考虑一个物种，还要考虑它所在的生态系统和生态过程。对于城市内涝和地面沉降的风险，增加城市地表的透水面积，合理构建地下排水管道、交通设施和开采地下资源，禁止对城市植被、周边耕地、湿地及水域的破坏，以提高水量调蓄能力。在低影响开发思路的指导下，建设海绵型城市。最后，鉴于城市化过程和生态过程的复杂性和动态变化特征，建立完善的风险管理反馈机制，有效地保证管理措施能及时地根据管理效果和风险变化做出调整。

在未来一段时期内，有关城市化生态风险的研究重点将主要集中于以下几个方面：城市化的生态风险监测与数据采集加工、指标体系的统一与整合、评价方法论、空间分布特征与表达、预警与快速应急响应。城市化的生态风险评价方法也逐步从考虑单一风险源、单一受体、单一生境、小尺度向多风险源、多介质、生态系统水平及区域尺度发展。应通过研究生态系统功能服务与经济社会发展的耦合关系，建立针对风险源和风险受体的风险管理信息库，形成基于风险信息库的生态风险评价与管理动态反馈过程，逐步建立多目标风险源的生态风险管理方法，加强生态风险预警和防范，最终形成跨越城市与区域协调联动应对生态风险的管理体制和机制。

参考文献(References)：

[1] 王少剑，方创琳，王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度. 生态学报，2015，35(7)：2244-2254.

[2] 刘耀彬，李仁东，宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析. 地理学报，2005，60(2)：237-247.

[3] Yin K，Wang R S，An Q X，Yao L，Liang J. Using eco-efficiency as an indicator for sustainable urban development：a case study of Chinese provincial capital cities. Ecological Indicator，2014，36：665-671.

[4] Wang Q S, Yuan X L, Zhang J, Mu R M, Yang H C, Ma C Y. Key evaluation frame work for the impacts of urbanization on air environment—a case study. Ecological Indicators, 2013, 24: 266-272.

[5] United Nations. World Urbanization Prospects the 2011 Revision. New York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2012.

[6] Norton S B, Rodier D J, van der Schalie W H, Wood W P, Slimak M W, Gentile J H. A framework for ecological risk assessment at the EPA. Environmental Toxicology and Chemistry, 1992, 11(12): 1663-1672.

[7] 张思锋, 刘晗梦. 生态风险评价方法述评. 生态学报, 2010, 30(10): 2735-2744.

[8] 王美娥, 陈卫平, 彭驰. 城市生态风险评价研究进展. 应用生态学报, 2014, 25(3): 911-918.

[9] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 李锋, 陈展. 生态风险评价及研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1869-1876.

[10] 吴文婕, 石培基, 胡巍. 基于土地利用/覆被变化的绿洲城市土地生态风险综合评价——以甘州区为例. 干旱区研究, 2012, 29(1): 122-128.

[11] 许丽丽, 李宝林, 袁烨城, 高锡章, 刘海江, 董贵华. 2000-2010 年中国耕地变化与耕地占补平衡政策效果分析. 资源科学, 2015, 37(8): 1543-1551.

[12] 吕苑鹃. 全国耕地面积继续维持在 20.25 亿亩. 中国国土资源报, 2016-08-11(001).

[13] 刘文超, 颜长珍, 秦元伟, 闫慧敏, 刘纪远. 近 20 a 年陕北地区耕地变化及其对农田生产力的影响. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1373-1382.

[14] Martellozzo F, Ramankutty N, Hall R J, Price D T, Purdy B, Friedl M A. Urbanization and the loss of prime farmland: a case study in the Calgary-Edmonton corridor of Alberta. Regional Environmental Change, 2015, 15(5): 881-893.

[15] Škrbić B D, Marinković V, Antić I, Petrović Gegić A. Seasonal variation and health risk assessment of organochlorine compounds in urban soils of Novi Sad, Serbia. Chemosphere, 2017, 181: 101-110.

[16] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 杨云马, 周亚鹏, 赵立宾. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响. 农业环境科学学报, 2005, 24(S1): 81-84.

[17] Seto K C, Ramankutty N. Hidden linkages between urbanization and food systems. Science, 2016, 352(6288): 943-945.

[18] Barbier E B. Explaining agricultural land expansion and deforestation in developing countries. American Journal of Agricultural Economics, 2004, 86(5): 1347-1353.

[19] Mcgill B. Biodiversity: land use matters. Nature, 2015, 520(7545): 38-39.

[20] Newbold T, Hudson L N, Hill S L L, Contu S, Lysenko I, Senior R A, Börger L, Bennett D J, Choimes A, Collen B, Day J, de Palma A, Díaz S, Echeverria-Londoño S, Edgar M J, Feldman A, Garon M, Harrison M L K, Alhusseini T, Ingram D J, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia D L P, Martin C D, Meiri S, Novosolov M, Pan Y, Phillips H R P, Purves D W, Robinson A, Simpson J, Tuck S L, Weiher E, White H J, Ewers R M, Mace G M, Scharlemann J P W, Purvis A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. Nature, 2015, 52(7545): 45-50.

[21] 吴未, 陈明, 范诗薇, 欧名豪. 基于空间扩张互侵过程的土地生态安全动态评价——以(中国)苏锡常地区为例. 生态学报, 2016, 36(22): 7453-7461.

[22] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677.

[23] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 流域景观结构的城市化影响与生态风险评价. 生态学报, 2011, 31(12): 3432-3440.

[24] 杨凯, 袁雯, 赵军, 许世远. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应. 地理学报, 2004, 59(4): 557-564.

[25] 韩龙飞, 许有鹏, 杨柳, 邓晓军, 胡春生, 徐光来. 近 50 年长三角地区水系时空变化及其驱动机制. 地理学报, 2015, 70(5): 819-827.

[26] Elmore A J, Kaushal S S. Disappearing headwaters: patterns of stream burial due to urbanization. Frontiers in Ecology and the Environment, 2008, 6(6): 308-312.

[27] 邓晓军, 许有鹏, 韩龙飞, 李广, 王跃峰, 项捷, 徐光来. 城市化背景下嘉兴市河流水系的时空变化. 地理学报, 2016, 71(1): 75-85.

[28] Sear D A, Newson M D. Environmental change in river channels: a neglected element. Towards geomorphological typologies, standards and monitoring. Science of the Total Environment, 2003, 310(1/3): 17-23.

[29] 周洪建, 史培军, 王静爱, 高路, 郑憬, 于德永. 近 30 年来深圳河网变化及其生态效应分析. 地理学报, 2008, 63(9): 969-980.

[30] Deng X J, Xu Y P, Han L F, Song S, Yang L, Li G, Wang Y F. Impacts of urbanization on river systems in the Taihu Region, China. Water, 2015, 7(4): 1340-1358.

[31] 许有鹏. 长江三角洲地区城市化对流域水系与水文过程的影响. 北京: 科学出版社, 2012.

[32] Costanza R, d´Arge Ralph, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O´Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world´s ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[33] Remondi F, Burlando P, Vollmer D. Exploring the hydrological impact of increasing urbanisation on a tropical river catchment of the metropolitan

Jakarta, Indonesia. Sustainable Cities and Society, 2015, 20: 210-221.
[34] Schütte S, Schulze R E. Projected impacts of urbanisation on hydrological resource flows: a case study within the uMngeni Catchment, South Africa. Journal of Environmental Management, 2017, 196: 527-543.
[35] Liu Y, Xu Y P, Shi Y. Hydrological effects of urbanization in the Qinhuai River Basin, China. Procedia Engineering, 2012, 28: 767-771.
[36] 李九一, 李丽娟, 柳玉梅, 梁丽乔, 李斌. 区域尺度水资源短缺风险评估与决策体系——以京津唐地区为例. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1041-1048.
[37] Eliasson J. The rising pressure of global water shortages. Nature, 2015, 517(7532): 6.
[38] 谢翠娜, 许世远, 王军, 刘耀龙, 陈振楼. 城市水资源综合风险评价指标体系与模型构建. 环境科学与管理, 2008, 33(5): 163-168.
[39] 孙红, 米锋, 田明华, 彭强. 北京市城市绿化用水的供需风险评估. 水土保持通报, 2014, 34(5): 153-157.
[40] 王春花, 梁丽君, 张静姝, 胡伟, 王玉秋. 某城市再生水中多环芳烃健康风险评价研究. 环境与健康杂志, 2010, 27(9): 800-803.
[41] 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营. 再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险. 环境科学, 2014, 35(3): 1041-1050.
[42] 潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安. 绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析. 环境科学, 2012, 33(12): 4088-4093.
[43] 何星海, 马世豪, 李安定, 潘小川, 陈清, 王静芬. 再生水利用健康风险暴露评价. 环境科学, 2006. 27(9): 1912-1915.
[44] 侯伟, 李智, 陈峰, 李晓军, 薛爽, 庞香蕊. 再生水回灌的农业环境风险及对策. 土壤通报, 2013, 44(1): 240-244.
[45] Mcdonnell M J, Pickett S T A. Ecosystem structure and function along urban-rural gradients: an unexploited opportunity for ecology. Ecology, 1990, 71(4): 1232-1237.
[46] Dobbs C, Nitschke C, Kendal D. Assessing the drivers shaping global patterns of urban vegetation landscape structure. Science of the Total Environment, 2017, 592: 171-177.
[47] Dale A G, Frank S D. The effects of urban warming on herbivore abundance and street tree condition. PLoS One, 2014, 9(7): e102996.
[48] Honour S L, Bell J N B, Ashenden T W, Cape J N, Power S A. Responses of herbaceous plants to urban air pollution: effects on growth, phenology and leaf surface characteristics. Environmental Pollution, 2009, 157(4): 1279-1286.
[49] Wang H, Ouyang Z Y, Chen W P, Wang X K, Zheng H, Ren Y F. Water, heat, and airborne pollutants effects on transpiration of urban trees. Environmental Pollution, 2011, 159(8/9): 2127-2137.
[50] Chace J F, Walsh J J. Urban effects on native avifauna: a review. Landscape and Urban Planning, 2006, 74(1): 46-69.
[51] Sol D, Bartomeus I, GonzálezLagos C, Pavoine S. Urbanisation and the loss of phylogenetic diversity in birds. Ecology Letters, 2017, 20(6): 721-729.
[52] Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(40): 16083-16088.
[53] Güneralp B, Seto K C. Futures of global urban expansion: uncertainties and implications for biodiversity conservation. Environmental Research Letters, 2013, 8(1): 014025.
[54] Giam X. Global biodiversity loss from tropical deforestation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(23): 5775-5777.
[55] McKinney M L. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. Biological Conservation, 2006, 127(3): 247-260.
[56] Dornelas M, Gotelli N J, McGill B, Shimadzu H, Moyes F, Sievers C, Magurran A E. Assemblage time series reveal biodiversity change but not systematic loss. Science, 2014, 344(6181): 296-299.
[57] Knapp S, Winter M, Klotz S, Bennett J. Increasing species richness but decreasing phylogenetic richness and divergence over a 320 - year period of urbanization. Journal of Applied Ecology, 2017, 54(4): 1152-1160.
[58] Parikh J, Shukla V. Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development: results from a cross-national study of developing countries. Global Environmental Change, 1995, 5(2): 87-103.
[59] York R. Demographic trends and energy consumption in European Union Nations, 1960-2025. Social Science Research, 2007, 36(3): 855-872.
[60] Song C B, Wu L, Xie Y C, He J J, Chen X, Wang T, Lin Y C, Jin T S, Wang A X, Liu Y, Dai Q L, Liu B S, Wang Y N, Mao H J. Air pollution in China: status and spatiotemporal variations. Environmental Pollution, 2017, 227: 334-347.
[61] Platt S M, Haddad I E, Pieber S M, Huang R J, Zardini A A, Clairotte M, Suarez-Bertoa R, Barmet P, Pfaffenberger L, Wolf R, Slowik J G, Fuller S J, Kalberer M, Chirico R, Dommen J, Astorga C, Zimmermann R, Marchand N, Hellebust S, Temime-Roussel B, Baltensperger U, Prévôt A S. Two-stroke scooters are a dominant source of air pollution in many cities. Nature Communications, 2014, 5: 3749.
[62] Karagulian F, Belis C A, Dora C F C, Prüss-Ustün A M, Bonjour S, Adair-Rohani H, Amann M. Contributions to cities´ ambient particulate matter (PM): a systematic review of local source contributions at global level. Atmospheric Environment, 2015, 120: 475-483.
[63] Zhao Z Z, Dong S K, Jiang X M, Liu S L, Ji H Z, Li Y, Han Y H, Sha W. Effects of warming and nitrogen deposition on CH_4, CO_2 and N_2O emissions in alpine grassland ecosystems of the Qinghai-Tibetan Plateau. Science of the Total Environment, 2017, 592: 565-572.

[64] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, Lam Y F, Li L, Zhang L. Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1582-1596.

[65] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, Jiang L J, Liu X J. Ground-level O_3 pollution and its impacts on food crops in China: a review. Environmental Pollution, 2015, 199: 42-48.

[66] Burns D A, Aherne J, Gay D A, Lehmann C M B. Acid rain and its environmental effects: Recent scientific advances. Atmospheric Environment, 2016, 146: 1-4.

[67] Qiao Q Q, Huang B C, Piper J D A, Biggin A J, Zhang C X. The characteristics of environmental particulate matter in the urban area of Beijing, China, during the 2008 Olympic Games. Atmospheric Pollution Research, 2017, 8(1): 141-148.

[68] Ahmed G, Anawar H M, Takuwa D T, Chibua I T, Singh G S, Sichilongo K. Environmental assessment of fate, transport and persistent behavior of dichlorodiphenyltrichloroethanes and hexachlorocyclohexanes in land and water ecosystems. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(8): 2741-2756.

[69] Wang Q, Yang Z M. Industrial water pollution, water environment treatment, and health risks in China. Environmental Pollution, 2016, 218: 358-365.

[70] Vonlanthen P, Bittner D, Hudson A G, Young A K, Müller R, Lundsgaard-Hansen B, Roy D, Di Piazza S, Largiader C R, Seehausen O. Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations. Nature, 2012, 482(7385): 357-362.

[71] 齐学斌, 李平, 亢连强, 樊向阳, 乔冬梅, 赵志娟, 樊涛, 黄仲冬. 变饱和带条件下污水灌溉对土壤氮素运移和冬小麦生长的影响. 生态学报, 2008, 28(4): 1636-1645.

[72] Lu Y L, Song S, Wang R S, Liu Z Y, Meng J, Sweetman A J, Jenkins A, Ferrier R C, Li H, Luo W, Wang T Y. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. Environment International, 2015, 77: 5-15.

[73] Hoornweg D, Bhada-Tata P, Kennedy C. Environment: waste production must peak this century. Nature, 2013, 502(7473): 615-617.

[74] 赵春兰, 凌成鹏, 吴勇, 卓勇. 垃圾渗滤液对地下水水质影响的数值模拟预测——以冕宁县漫水湾生活垃圾填埋场为例. 环境工程, 2017, 35(2): 163-167.

[75] Ghosh P, Thakur I S, Kaushik A. Bioassays for toxicological risk assessment of landfill leachate: a review. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 141: 259-270.

[76] Kalcikovά G, Vάvrovά M, Zagorc-Koncan Z, Gotvajn A Ž. Seasonal variations in municipal landfill leachate quality. Management of Environmental Quality: An International Journal, 2011, 22(5): 612-619.

[77] Komilis D P, Ham R K, Park J K. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid wastes. Water Research, 2004, 38(7): 1707-1714.

[78] Ballinger R C, Potts J S, Bradly N J, Pettit S J. A comparison between coastal hazard planning in New Zealand and the evolving approach in England and Wales. Ocean & Coastal Management, 2000, 43(10/11): 905-925.

[79] Murray V, Mcbean G M, Bhatt M, Borsch S, Cheong S. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 2011, 18(6): 586-599.

[80] Li W F, Cao Q W, Lang K, Wu J S. Linking potential heat source and sink to urban heat island: Heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature. Science of the Total Environment, 2017, 586: 457-465.

[81] Wang J, Yan Z W, Quan X W, Feng J M. Urban warming in the 2013 summer heat wave in eastern China. Climate Dynamics, 2017, 48(9/10): 3015-3033.

[82] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. Nature, 2003, 423(6939): 528-531.

[83] Sun Y, Zhang X B, Ren G Y, Zwiers F W, Hu T. Contribution of urbanization to warming in China. Nature Climate Change, 2016, 6(7): 706-709.

[84] 杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 城市化对极端高温事件影响研究进展. 地理科学进展, 2015, 34(10): 1219-1228.

[85] Zhang J, Liu S Q, Han J, Zhou L, Liu Y L, Yang L, Zhang J, Zhang Y. Impact of heat waves on nonaccidental deaths in Jinan, China, and associated risk factors. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(9): 1367-1375.

[86] Richter M. Urban climate change-related effects on extreme heat events in Rostock, Germany. Urban Ecosystems, 2016, 19(2): 849-866.

[87] Patz J A, Campbell-Lendrum D, Holloway T, Foley J A. Impact of regional climate change on human health. Nature, 2005, 438(7066): 310-317.

[88] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, Tarver G Jr, 王效科, 苗鸿. 城市热岛的生态环境效应. 生态学报, 2005, 25(8): 2056-2060.

[89] 侯颖, 周会萍, 张超. 城市化对土壤微生物群落结构的影响. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1108-1112.

[90] Zipper S C, Schatz J, Kucharik C J, Loheide II S P. Urban heat island-induced increases in evapotranspirative demand. Geophysical Research Letters, 2017, 44(2): 873-881.

[91] Kueppers L M, Conlisk E, Castanha C, Moyes A B, Germino M J, De Valpine P, Torn M, Mitton J B. Warming and provenance limit tree

recruitment across and beyond the elevation range of subalpine forest. Global Change Biology, 2017, 23(6): 2383-2395.

[92] Ordóñez C, Duinker P N. Assessing the vulnerability of urban forests to climate change. Environmental Reviews, 2014, 22(3): 311-321.

[93] Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, Corfee-Morlot J. Future flood losses in major coastal cities. Nature Climate Change, 2013, 3(9): 802-806.

[94] 马光. 环境与可持续发展导论(第二版). 北京: 科学出版社, 2004: 93-194.

[95] Ntajal J, Lamptey B L, Mahamadou I B, Nyarko B K. Flood disaster risk mapping in the Lower Mono River Basin in Togo, West Africa. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 23: 93-103.

[96] Gaines J M. Flooding: water potential. Nature, 2016, 531(7594): S54-S55.

[97] 薛禹群, 张云, 叶淑君, 李勤奋. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题. 第四纪研究, 2003, 23(6): 585-593.

[98] Yin J, Yu D P, Wilby R. Modelling the impact of land subsidence on urban pluvial flooding: a case study of downtown Shanghai, China. Science of the Total Environment, 2016, 544: 744-753.

[99] Sun H, Zhang Q, Zhao C Y, Yang C S, Sun Q F, Chen W R. Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique. Remote Sensing of Environment, 2017, 188: 73-84.

[100] Perrodin Y, Boillot C, Angerville R, Donguy G, Emmanuel E. Ecological risk assessment of urban and industrial systems: a review. Science of the Total Environment, 2011, 409(24): 5162-5176.

[101] 陈春丽, 吕永龙, 王铁宇, 史雅娟, 胡文友, 李静, 张翔, 耿静. 区域生态风险评价的关键问题与展望. 生态学报, 2010, 30(3): 808-816.

[102] Lu Y L, Wang R S, Zhang Y Q, Su H Q, Wang P, Jenkins A, Ferrier R C, Bailey M, Squire G. Ecosystem health towards sustainability. Ecosystem Health and Sustainability, 2015, 1(1): 1-15.

[103] Dagnino A, Sforzini S, Dondero F, Fenoglio S, Bona E, Jensen J, Viarengo A. A weight-of-evidence approach for the integration of environmental "triad" data to assess ecological risk and biological vulnerability. Integrated Environmental Assessment and Management, 2008, 4(3): 314-326.

[104] Obery A M, Landis W G. A regional multiple stressor risk assessment of the codorus creek watershed applying the Relative Risk Model. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2002, 8(2): 405-428.

[105] Shi Y J, Wang R S, Lu Y L, Song S, Johnson A C, Sweetman A, Jones K. Regional multi-compartment ecological risk assessment: establishing cadmium pollution risk in the northern Bohai Rim, China. Environment International, 2016, 94: 283-291.

[106] 周平, 蒙吉军. 区域生态风险管理研究进展. 生态学报, 2009, 29(4): 2097-2106.

[107] 白杨, 王晓云, 姜海梅, 刘寿东. 城市热岛效应研究进展. 气象与环境学报, 2013, 29(2): 101-106.